

가변금형을 이용한 스트레치 성형장치 개발

서영호¹ · 허성찬¹ · 박종원¹ · 구태완² · 송우진³ · 김 정² · 강범수[#]

Development of Stretch Forming Apparatus using Flexible Die

Y. H. Seo, S. C. Heo, J. W. Park, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang

(Received November 26, 2009 / Revised December 4, 2009 / Accepted December 7, 2009)

Abstract

A stretch forming method has been widely used in sheet metal forming process. Especially, this process has been adopted in aircraft and high-speed train industries for skin structure forming having a variety of curvature. Until now, solid dies, which are designed with respect to the specific shapes and manufactured as a single piece, have been usually applied to stretch forming process. Therefore, a great number of solid dies has to be developed according to the shapes of the curved skin structure. Accordingly, a flexible die is proposed in this study. It replaces the conventional solid dies with a set of height adjustable punch array. A usefulness of the flexible die is verified through a formability comparison with the solid die using finite element method considering an elastic recovery and the stretch forming apparatus with the flexible die is developed.

Key Words : Stretch Forming, Flexible Die, Sheet Forming, Elastic Recovery, Finite Element Analysis

1. 서 론

항공기 및 고속 철도차량의 외피 구조물(skin structure)은 주로 다양한 곡률을 가지는 알루미늄 혹은 티타늄 박판으로서[1], 곡면을 성형함에 있어서 굽힘 작업만으로는 판재가 받는 변형상태가 탄성 영역내에 존재하여 탄성회복이 필연적으로 발생한다. 따라서 판재의 변형상태를 소성영역으로 유도하기 위한 방법으로 스트레치 성형공정(stretch forming process)이 널리 사용되고 있다[2~4]. 그러나 항공기 및 고속철도 산업에서, 하나의 완제품에 소요되는 외피 구조물은 다양한 형상을 가지므로 다품종 소량생산의 특성을 가지게 되며 [5], 이로 인하여 다음과 같은 문제점을 야기하기도 한다. 현재 스트레치 성형공정에는 단일금형이

사용되고 있어 외피 구조물의 다양한 형상 및 곡률 분포에 따라 다수의 금형을 제작해야 하며, 이에 따라 생산 비용의 증가는 불가피하다. 또한, 성형공정의 전환 시 금형의 교체 시간과 노동력의 소모가 요구되며, 다수의 금형 보관에 있어서도 많은 공간을 차지하는 등의 단점이 있다. 이는 생산비용의 증가뿐만 아니라 생산성 저하의 요인이 된다. 따라서 다품종 소량생산 특성에 부합하는 새로운 개념의 성형공정의 제시가 요구된다.

최근 3차원 곡면을 가공함에 있어서 일정하게 배열된 다수의 펀치와 결합된 유압프레스를 이용하여 다양한 형상의 곡면을 가공하는 가변성형공정이 개발 단계에 있다[6]. Fig. 1과 같은 가변금형은 기존의 단일금형을 여러 개의 펀치로 분할하여 펀치의 접촉점에 따라 위치를 조절함으로써

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원
2. 부산대학교 항공우주공학과
3. 부산대학교 부품소재산업협력연구소
교신저자: 부산대학교 항공우주공학과, bskang@pusan.ac.kr

써 3차원 곡면을 자유롭게 구성하여 판재를 성형할 수 있다. 따라서 하나의 가변금형을 통하여 다양한 형상의 곡면성형이 가능하다[6-8]. 본 연구에서는 가변금형을 이용한 가변 스트레치 성형공정을 제시하였고, 유한요소해석을 통하여 기존의 단일금형을 대체하기 위한 가변금형의 적합성을 검토하였다. 또한, 성형성을 향상시키기 위한 방안도 고려되었으며, 이를 통하여 가변 스트레치 성형장치를 개발하였다.

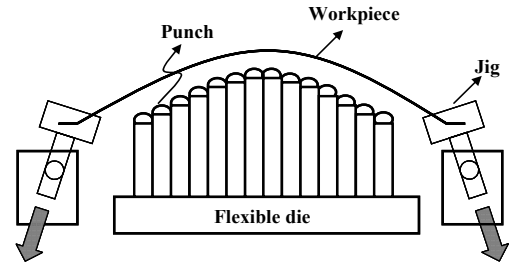


Fig. 1 Conceptual design for flexible stretch forming

2. 가변금형의 스트레치 성형공정 적용

2.1 펀치높이 산출원리

가변금형을 스트레치 성형공정에 적용하기 위해서는 우선적으로 목적곡면에 부합하는 펀치의 상대높이가 예측되어야 하며, 이를 통하여 단일금형과 등가인 곡면을 구현할 수 있다. 스트레치 성형공정을 통하여 생산되는 박판 구조물은 주로 단일 곡률을 가지는 단순한 형상이므로 본 연구에서는 단일 곡률을 가지는 곡면에 국한하여 펀치높이 산출원리를 적용하였다.

펀치 끝의 형상은 Fig. 2와 같이 구면의 일부로 이루어져 있으며, 펀치의 폭(W_p)은 펀치반경 R 과 펀치반경 중심에서의 θ 의 관계[6]에 의하여 식 (1)과 같이 정의된다. 본 연구에 사용된 펀치 끝의 형상은 반구로 가정하였다.

$$W_p = 2R \sin(\theta/2) \quad (1)$$

Fig. 3에 나타난 바와 같이 곡판 중심면을 기준으로 한 곡률 반경 r , 판재두께 t , 펀치 폭 W_p , 펀치의 개수 N_p , 펀치의 반경중심이 이루는 곡률 $r_u (= r - (t + W_p)/2)$ 를 정의하면 피타고라스 정리에 의해 곡판 상부의 i 번째 펀치높이는 식(2)에 의해서 결정된다.

$$h_{u,i} = r_u - \sqrt{r_u^2 - \left(\text{abs} \left[i - (N_p + 1) / 2 \right] \times W_p \right)^2} \quad (2)$$

2.2 유한요소해석을 통한 적합성 검증

2.2.1 유한요소모델

단일 곡률을 가지는 박판성형 해석에 사용된 모델을 Fig. 4(a)에 도시하였다. 판재의 크기는 1000mm×160mm, 두께는 1.0mm이며 300mm×160mm,

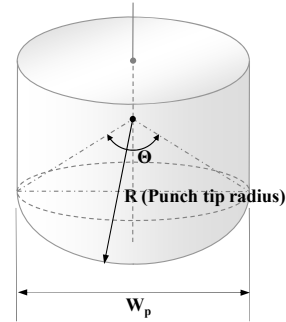


Fig. 2 Schematic view of punch tip

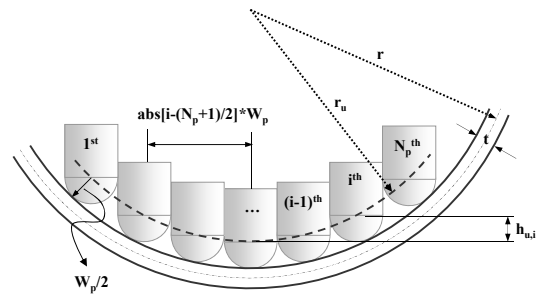


Fig. 3 Geometrical relationship for simply curved plate

250mm×160mm의 성형영역 및 자유성형 영역을 설정하였으며, 양 끝단의 클램프 크기는 100mm×160mm이다. 가변금형에 사용된 펀치 폭은 20mm로서 성형영역에 대한 펀치배열은 15×8로 정의되었다. 해석 전체 모델의 대칭성을 고려하여 1/4 대칭모델에 대한 해석을 수행하였다. 성형방법은 Fig. 4(b)와 같이 블랭크의 양 끝단에 3mm의 인장을 부여함과 동시에 상단의 금형에 Z-방향으로 변위하중을 주었다.

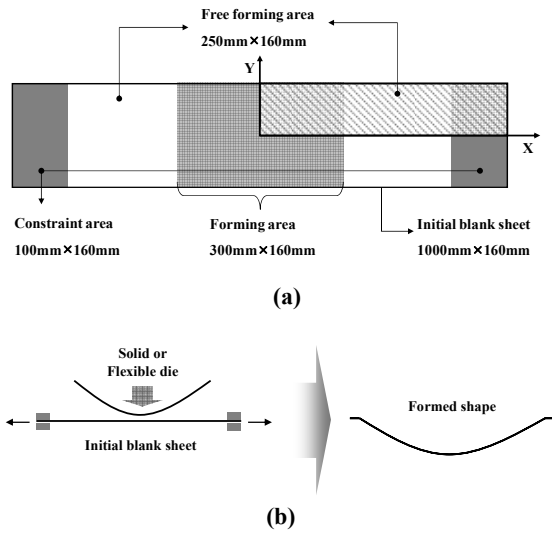


Fig. 4 (a) Analysis model, (b) Analysis conditions

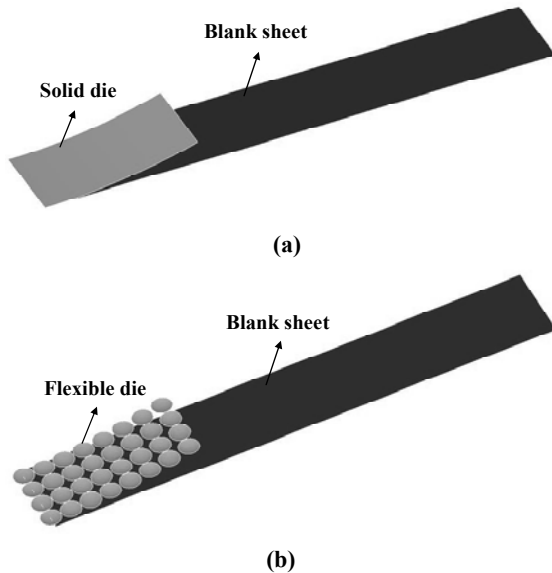


Fig. 5 (a) Finite element model using solid die, (b) Finite element model using flexible die

가변금형의 적합성 검증해석에 사용된 유한요소모델을 Fig. 5(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 단일금형 및 가변금형을 사용한 모델의 목적곡면은 500mm의 단일 목적곡률을 가진다. 앞선 2.1절에서 제시한 단일곡률을 가지는 곡면에 대한 펀치높이 산출원리와 펀치의 위치 데이터에 대한 입력 및 출력이 용이한 전처리 프로그램인 ANSYS

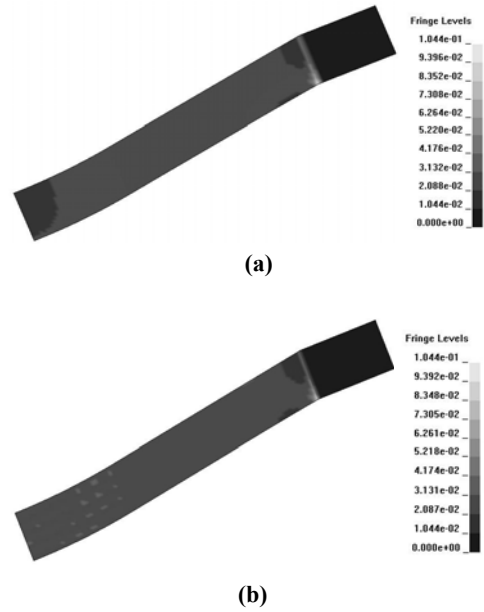


Fig. 6 (a) Plastic strain distribution by solid die, (b) Plastic strain distribution by flexible die

에서 제공하는 프로그래밍 언어(ANSYS parametric design language)를 사용하여 가변금형을 모델링하였다. 박판소재는 AA 2024-O이며, 소재의 물성 모델로는 가공 경화식 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ (소성강도계수 $K = 320.9\text{MPa}$, 가공경화지수 $n = 0.21$)을 사용하였다. 펀치와 소재간의 마찰계수는 0.1~0.2의 범위내에서 해석결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 0.2로 설정하였다[1]. 성형해석에는 외연적 기법(explicit method)을 기반으로 하는 LS-DYNA가 적용되었다. 성형해석 후 내연적 기법(implicit method) 기반의 ANSYS를 이용하여 탄성 회복량을 예측하였다. 최종적으로 유한요소해석을 통하여 예측된 길이방향으로의 곡률분포를 비교하였다.

2.2.2 가변금형 적용 가능성 검토

Fig. 6(a) 및 (b)는 성형 직후 변형률 분포를 도시하고 있으며, 검토 결과 전체적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 Fig. 7에서 도시하고 있는 단일 혹은 가변금형과 접촉하여 성형이 이루어지는 구간 즉, 길이방향의 대칭면 A-A'의 곡률분포는 거의 일치한다. 따라서 가변 스트레치 성형의 적합성을 검증할 수 있으며, 앞서 제시한 단순곡면에 대한 펀치높이 산출원리 또한 성형해석 모델링에 적용될 수 있음을 확인하였다.

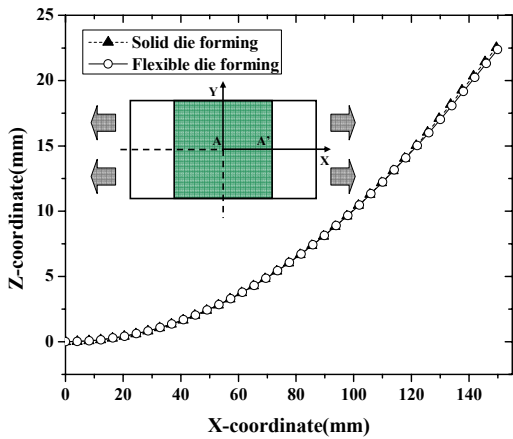
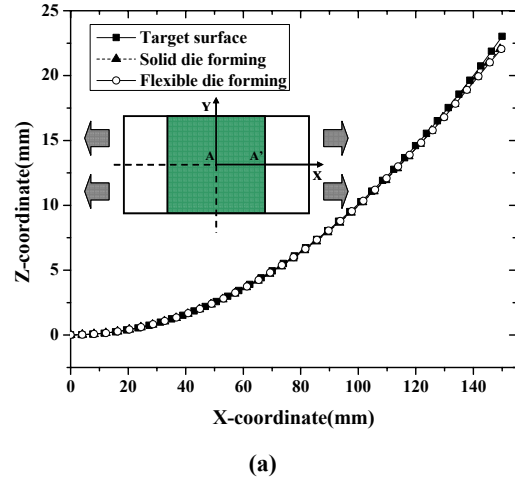


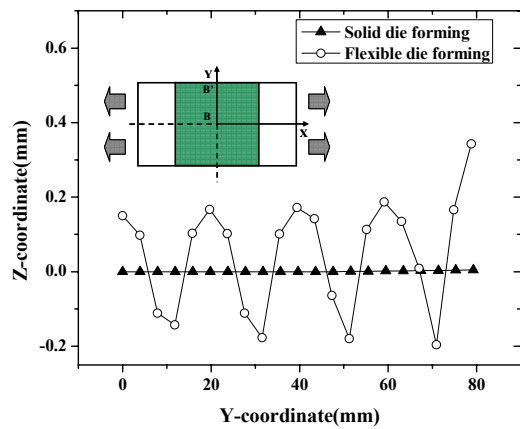
Fig. 7 Sectional profile configuration along A-A'

박판 성형공정 중 필연적으로 발생하는 탄성회복 해석을 수행하였다. 해석모델의 대칭조건 및 모델의 중앙에 위치하는 절점에 구속조건을 부여하여 탄성회복 거동을 예측하였다. 성형구간의 길이방향 대칭면 A-A'에 대한 형상을 검토한 결과 Fig. 8(a)에 도시한 바와 같이 탄성회복이 발생함을 확인할 수 있었다. 목적곡률 반경이 500mm인 반면 탄성회복 후의 곡률반경은 단일 및 가변금형을 사용하였을 경우 약 520mm로 예측되었다. 비록 탄성회복에 의하여 20mm의 곡률반경 오차가 발생하였지만, 박판성형 시 크게 발생하는 탄성회복 특성을 감안하면 길이방향의 소재의 연신에 따라 그 양이 감소하였다고 판단 가능하다. 또한, 단일금형에 대한 가변금형의 적합성을 재차 검증할 수 있었다.

길이방향에서 소재의 인장이 발생하는 반면 폭 방향에 대해서는 소재의 수축이 발생한다. 단일금형을 사용한 스트레치 성형 시 성형성에 영향을 미치지 않지만, 가변금형 사용시에는 소재의 국부적인 수축 거동과 펀치 사이의 공극에 의한 소재의 폭 방향으로의 성형결함을 예측할 수 있다. 따라서 Fig. 8(b)에 폭 방향으로의 곡면 형상을 도시하여 검토한 결과, 가변 스트레치 성형공정에서 펀치의 윤곽에 따라 주름이 발생하였다. 이는 불연속적인 펀치로 이루어진 가변금형에 소재접촉시 펀치 사이의 공극으로 인해 곡면을 유지하지 못하여 국부적으로 변형이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 펀치공극의 영향을 최소화하기 위한 방안으로 고강도 우레탄 패드를 사용하였다.



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Sectional profile configuration along A-A' after elastic recovery, (b) Sectional profile configuration along B-B' after elastic recovery

2.2.3 우레탄 패드의 효용성 검토

유한요소해석을 바탕으로 가변 스트레치 성형공정의 적합성을 검증한 결과, 가변금형의 펀치사이 공극으로 인해 폭 방향으로 판재의 굴곡이 발생하는 성형결함을 확인하였다(Fig. 8참조). 성형결함을 억제하기 위하여 비교적 작은 크기의 펀치를 사용하는 방법이 적용되기도 하지만, 그에 따라 펀치의 수 및 가공비가 증가하게 되어 제작비용 측면에서 비경제적이다. 따라서, 본 연구에서는 판재와 가변금형 사이에 고강도 우레탄 패드를 사용하여 펀치 사이의 공극이 판재의 성형성에 미치는 영향을 최소화하는 방안을 제시하였으

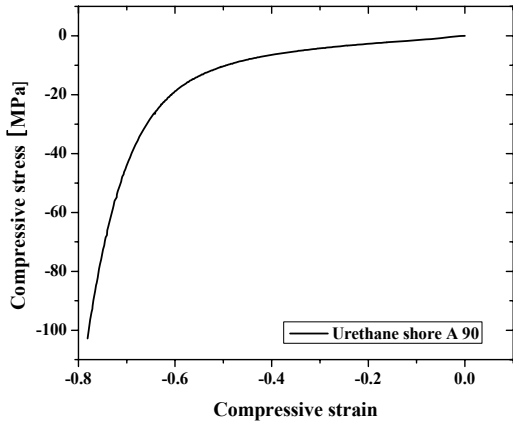


Fig. 9 Uniaxial compressive stress-strain curve for shore A 90 urethane

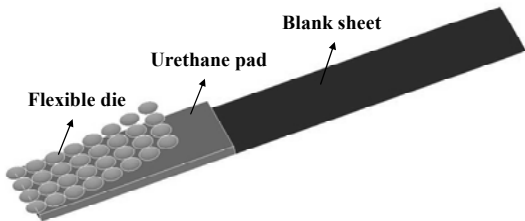


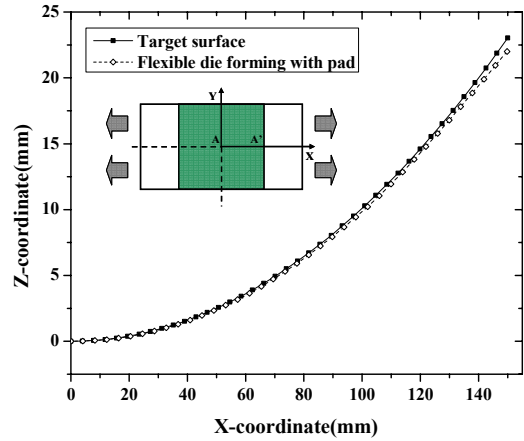
Fig.10 Finite element model of flexible stretch forming using urethane pad



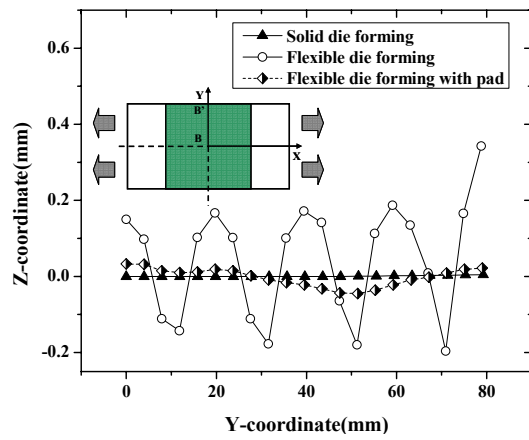
Fig.11 Plastic strain distribution by flexible die with urethane pad

며, 이에 대한 검증을 위하여 고강도 우레탄 패드를 사용한 가변 스트레치 성형공정에 대한 유한요소해석을 추가적으로 수행하였으며, 길이방향 및 폭 방향의 성형성을 비교하였다.

관재와 가변금형 사이에 삽입된 탄성체인 고강도 우레탄은 큰 변형에서도 탄성을 유지하며, 하중과 변형이 비선형적인 거동을 나타낸다. 유한요소해석에서 고강도 우레탄의 거동을 나타내기 위



(a)



(b)

Fig.12 (a) Sectional profile configuration along A-A' after elastic recovery, (b) Sectional profile configuration along B-B' after elastic recovery

하여 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다. 초탄성체의 거동을 표현하는 변형 에너지 함수는 다음과 같은 식으로 표현되며, C_{10} 및 C_{01} 은 Mooney-Rivlin 상수로서 압축실험을 통하여 도출하였다. 또한 유한요소해석에 사용된 Shore A 경도 90의 우레탄 변형률-응력 선도를 Fig. 9에 도시하였다.

$$\omega = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (3)$$

고강도 우레탄을 이용한 가변 스트레치 성형해석 모델을 Fig. 10에 도시하였다. 우레탄은 가변금형과 소재간의 접촉이 없도록 400mm×180mm의 크

기로 모델링 되었으며, 두께는 10mm이다. 우레탄 이외의 모델 및 해석조건은 앞선 모델과 동일하지만, 펀치의 상대적인 높이는 우레탄 두께를 고려하여 10mm만큼 오프셋(offset)시켜 계산되어야 한다. 성형 직후 판재의 변형률 분포를 Fig. 11에 도시하였으며, 앞선 모델과 유사한 경향을 나타내고 있다.

또한, 탄성회복 후의 길이방향의 대칭면 A-A'에 대한 형상을 목적곡면과 비교하여 Fig. 12(a)에 도시하였다. 앞선 결과와 마찬가지로 곡률반경 오차가 발생하였지만 그 양은 미미하며, 유한요소해석을 이용한 시행 착오법을 통하여 최종 곡률반경이 500mm가 되도록 목적곡물의 설계가 가능할 것으로 판단된다 [6].

마지막으로 Fig. 12(b)에 나타난 바와 같이 폭 방향의 대칭면 B-B'의 형상을 확인한 결과 펀치 사이의 공극에 의한 영향이 크게 감소함을 확인하였다. 하지만 우레탄 패드를 사용한 결과 단일 금형 해석 결과에 비해 여전히 굴곡이 존재한다. 이에 대한 원인은 우레탄 패드가 가변금형의 공극을 완전히 상쇄시키지 못하였다고 판단할 수 있다. 따라서 우레탄 패드의 영향성에 대한 후속 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

3. 가변 스트레치 성형장치 개발

3.1 성형공정설계

Fig. 13에 가변 스트레치 성형공정을 나타내었다. 목적곡면의 곡률에 따라 펀치의 접촉점이 결정되고, 그에 따라 펀치모듈은 목적곡면과 등가인 곡면을 형성하게 된다(Fig. 13(a)). 성형에 앞서 성형 결함을 방지하기 위한 우레탄이 삽입되며, 박판소재는 가변성형장치의 그림에 의해 고정된다(Fig. 13(b)). 탄성회복을 억제하기 위하여 소재의 양 끝에 인장력을 가해 전변형을 부여함과 동시에 펀치모듈을 하강시킴으로써 성형하게 된다(Fig. 13(c)). 마지막으로 펀치모듈과 그림을 제거하여 가변 스트레치 성형공정을 마치게 된다(Fig. 13(d)).

3.2 가변 스트레치 성형장치 개발

가변 스트레치 성형장치의 핵심은 펀치모듈이 목적곡면과 등가인 곡면을 형성하여 판재를 성형하는 것이다. 따라서, 목적곡면과 등가인 펀치배열을 위해서 임의의 곡면에 따른 펀치의 위치를 결정할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에

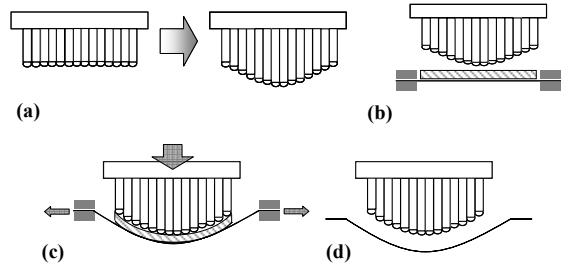


Fig.13 Flexible stretch forming process

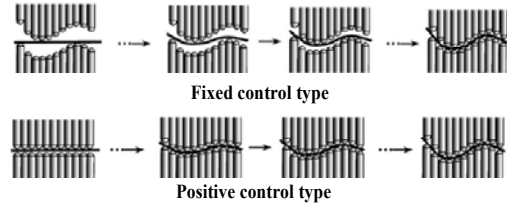


Fig.14 Two types of punch control method

서 필요한 단순곡면에 대한 펀치위치 산출원리는 2.1절에서 언급하였으며, 이를 통하여 GUI기반 펀치위치 산출프로그램을 개발하였다.

펀치위치 산출프로그램을 통하여 계산된 펀치위치 데이터를 활용하여 목적곡면과 등가인 곡면을 펀치모듈로서 구현하기 위하여 펀치를 순차적으로 제어해야 한다. 펀치를 제어하는 방식은 Fig. 14와 같이 고정형과 능동형 2가지 제어방식이 있다. 고정형 제어방식은 성형에 앞서 펀치 배열을 목적곡면에 따라 배치하여 단일금형 대신 이용하는 방법으로 펀치 높이가 조절 후 성형 시 소요되는 시간이 비교적 짧으며 단순한 곡면 가공에 적합하다. 반면 능동형 제어방식은 공정 중 펀치의 위치를 동시에 실시간 제어하여 성형하는 방법으로 공정 초기부터 모든 펀치가 판재와 접촉하여 하중이 전달되므로 국부적인 변형을 피할 수 있어 고정형에 비하여 성형성이 향상될 수 있다. 하지만, 펀치 높이와 하중을 동시에 제어해야 하므로 정확한 제어가 어렵고 개별 펀치마다 유압장치 등이 연결되어야 하므로 장치 구성에 있어 비용이 크게 소요되는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 고정식 가변성형공정을 채택하여 적용하였다.

Fig. 15와 같이 제작된 펀치모듈은 X 방향으로 15개, Y 방향으로 10개의 펀치가 배열되어 총 150개의 펀치로 구성되어 있으며, 각각의 펀치의 위



Fig.15 Developed punch module

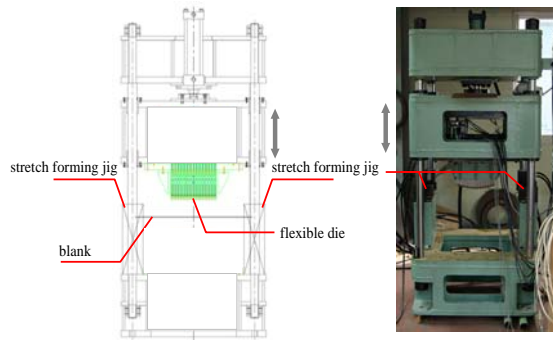


Fig.16 Flexible stretch forming apparatus

Table 1 Specifications of flexible stretch forming apparatus

Max. of forming force	50kN
Forming area	300mm × 200mm
Cross section of punch	20mm × 20mm
Number of punches	150EA
Adjusting height of punch	80mm

치는 모터로서 제어된다. 모든 펀치에 모터를 결합하여 동시에 위치제어를 함으로서 펀치배열에 소요되는 시간을 크게 절감할 수 있지만, 모터가 고가의 부품이므로 펀치와 모터의 1:1 배치는 생산비용의 상승 요인이 된다. 따라서, 중횡방향의 움직임을 결정하는 모터와 펀치의 높이 조절에 직접적으로 이용되는 다수의 모터세트를 활용하여 설계하였다.

최종적으로 Fig. 16과 같은 가변 스트레치 성형 장치를 개발하였으며, 세부 사양을 Table 1에 표기하였다. 스트레치 성형 시 펀치 사이의 공극으로 인한 영향을 최소화하기 위하여 우레탄 패드를

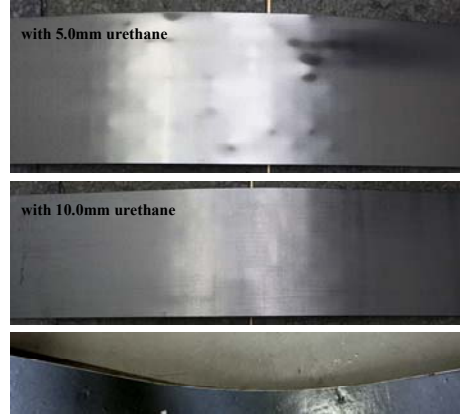
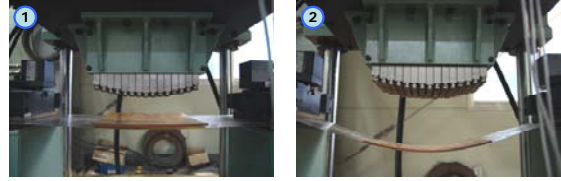


Fig.17 Flexible stretch forming result

사용하지만 근본적으로 성형오차의 원인을 제공하는 공극을 최대한 줄이기 위해 펀치의 크기를 20mm×20mm로 설정하여 폭 방향의 주름을 최대한 억제하고자 하였다.

3.3 가변 스트레치 성형시험

두께 1.0mm의 알루미늄 박판소재를 활용하여 가변 스트레치 성형시험을 수행하였다. 성형곡률 반경은 앞선 해석과 동일한 500mm로 설정하였으며, 고강도 우레탄 소재는 산업용 일반 우레탄인 Shore A 90 소재를 사용하였다. Fig. 17에 성형 시험 결과를 도시하였다. 5.0mm 두께의 우레탄을 사용할 경우 판재의 표면에 딥플이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 반면 10.0mm 두께의 우레탄을 가변금형과 판재 사이에 삽입하게 되면 딥플의 형성이 억제되어 판재의 성형성이 확연하게 좋아진다. 하지만, 펀치의 윤곽을 따라 국부적인 굴곡을 확인할 수 있는데, 이는 가변금형의 초기 배열 상태에서 펀치간의 편차에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 항공 및 고속철도 산업의 다품종 소량생산 특성에 부합하는 신 개념의 스트레

치 성형공정의 개발을 위하여 가변금형을 이용한 스트레치 성형장비를 개발하였으며, 다음과 같은 연구 성과를 얻을 수 있었다.

(1) 목적곡면에 따라 펀치의 위치를 예측하기 위하여 펀치 및 곡면의 형상계수를 활용하여 단일곡률을 가지는 곡면에 대한 펀치위치 산출원리를 제시하였으며, 유한요소 모델링에 적용하였다.

(2) 탄성회복을 고려한 유한요소해석을 수행하여 성형 후 곡률분포 비교를 통한 단일금형에 대한 가변금형의 적합성을 검증하였다.

(3) 펀치사이의 공극으로 인한 폭 방향으로의 성형결함을 억제하기 위하여 고강도 우레탄 패드를 사용하였으며, 이에 대한 효율성을 유한요소해석을 통하여 검증하였다.

(4) 펀치위치 산출원리에 고정식 펀치제어 방식을 적용하여 총 150개의 펀치로 구성된 펀치모듈 및 가변 스트레치 성형장치를 개발하였으며, 알루미늄 박판 성형시험을 수행하였다.

(5) 우레탄 패드에 따라 관재의 성형성이 좌우되는 것을 확인하였으며, 이에 따라 우레탄 패드의 영향성 평가에 대한 후속 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. ROA-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-02002-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Z. Y. Cai, S. H. Wang, X. D. Xu, M. Z. Li, 2009, Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, pp. 396~407.
- [2] Y. H. Seo, S. C. Heo, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2008, Flexible forming process analysis for sheet material curved surface forming, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 118~121.
- [3] D. W. Kim, I. S. Kwon, 1983, A study on the pure stretch forming of Al sheet, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 7, No. 1, pp. 64~72.
- [4] B. S. Kang, J. Y. Lim, J. Y. Bae, 1997, Process sequence design of the inner skin of landing gear using stretch forming process, Trans. Mater. Process., Vol. 6, No. 4, pp. 291~299.
- [5] J. Y. Hwang, S. M. Choi, S. H. Jeong, 2003, Strategies for building up capabilities in the Korean aircraft sub-system industry, J. Kor. Technol. Innovation Society, Special Volume, pp. 551~568.
- [6] S. C. Heo, Y. H. Seo, J. W. Park, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2008, Numerical and experimental study on plate forming process using flexible die, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 570~578.
- [7] Z. R. Qian, M. Z. Li, F. X. Tan, 2007, The analyses on the process of multi-point forming for dish head, J. Mater. Process. Technol., Vol. 187~188, pp. 471~475.
- [8] F. X. Tan, M. Z. Li, Z. Y. Cai, 2007, Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis, J. Mater. Process. Technol., Vol. 187~188, pp. 453~457.